

Estudio del potencial de producción de un combustible sostenible para aviación a partir de residuos forestales mediante el proceso de Fischer-Tropsch

Ignacia Ortega Chandia¹, Einara Blanco Machín¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile

Resumen

El crecimiento global de la industria de la aviación ha impulsado la búsqueda de soluciones para las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) que se generan en este sector. Los denominados combustibles sostenibles de aviación (SAF) han sido fundamentales en la estrategia de la industria de la aviación para reducir los impactos ambientales y la dependencia de los combustibles fósiles. En este estudio se revisan las tecnologías actuales aprobadas por la norma ASTM D7566 para la producción de SAF, las barreras tecnológicas y el potencial de producción que poseen. Se discuten los principales desafíos que presenta la síntesis por Fischer-Tropsch, incluyendo una descripción del proceso y la economía de este. Aunque el precio de la materia prima, la disponibilidad y la intensidad energética del proceso son barreras significativas, el SAF puede reemplazar una parte considerable del combustible de aviación convencional necesario para satisfacer la demanda comercial.

Palabras clave: Fischer-Tropsch; biocombustible; biomasa; gasificación.

Abstract

The global growth of the aviation industry has driven the search for solutions to the high concentrations of greenhouse gases (GHG) generated in this sector. So-called sustainable aviation fuels (SAF) have been central to the aviation industry's strategy to reduce environmental impacts and dependence on fossil fuels. This study reviews the current ASTM D7566-approved technologies to produce SAFs, the technological barriers and the production potential they possess. The main challenges presented by Fischer-Tropsch synthesis are discussed, including a description of the process and the economics of the process. Although feedstock price, availability and energy intensity of the process are significant barriers, PBS can replace a considerable portion of the conventional jet fuel needed to meet commercial demand.

Keywords: Fischer-Tropsch; biofuel; biomass; gasification.

1. Introducción

Hoy en día, los aviones comerciales son hasta un 30% más sustentables que las aeronaves que reemplazan. Esto se debe a varios factores como la mejora en los materiales de construcción, modificaciones en su geometría que les permiten ser más aerodinámicos, el uso de motores turbofán más eficientes, entre otros [1]. Estas modificaciones permiten reducir el peso

total de la aeronave, lo cual conlleva directamente a una disminución del consumo de combustible.

A pesar de estas mejoras significativas, las aeronaves siguen representando el medio de transporte más contaminante del mundo. Según datos de la coalición de expertos de la industria aeronáutica sobre desarrollo sostenible, el *Air Transport Action Group* (ATAG), la aviación es responsable del 12 % de las emisiones de CO₂, y durante el 2019, se produjeron aproximadamente 915 millones de toneladas de CO₂ a

nivel mundial, lo cual representa un 2.1 % del total de emisiones anuales emitidas por el ser humano [2]. En este complejo escenario, se hace imperativa la búsqueda de alternativas que contribuyan a reducir el impacto ambiental de las aeronaves, manteniendo sus condiciones actuales de operación y diseño.

En el contexto nacional, Chile busca alcanzar la carbono-neutralidad en el año 2050 implementando una serie de objetivos y medidas de transformación sectoriales, como es el caso del transporte aéreo. Entre los pasos que ha dado el país en esta materia se encuentra su participación en el Programa de Asistencia, Creación de Capacidad e Instrucción para los SAF (ACT – SAF) de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), que contribuye al desarrollo, producción e implementación del uso de biocombustibles [3].

Según un estudio realizado por la OACI, el uso de biocombustibles en la industria aérea puede reducir las emisiones de GEI en un 50% en comparación con los combustibles fósiles. Esto se debe a que los SAF emiten menos CO₂ durante su producción y posterior combustión.

La biomasa lignocelulósica, que incluye madera, trigo y arroz, puede ser procesada mediante el proceso termoquímico Fischer – Tropsch (FT). Esta técnica implica la gasificación de la biomasa para producir gas de síntesis, que luego, a través de la síntesis de FT, se obtiene como producción final el queroseno parafínico sintetizado (SPK) [4]. La principal ventaja de esta tecnología radica en la abundancia de residuos forestales disponibles en el país, además de que el biocombustible generado por este método carece de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x) presente en los combustibles convencionales [5].

Se deben tener en cuenta una serie de consideraciones técnicas y operativas para que el biocombustible sea compatible con los motores de avión actuales. En este sentido, la mayoría de los motores actuales funcionan con biocombustible mezclado con combustible tradicional sin necesidad de realizar modificaciones en la infraestructura existente.

En 2018, Chiong et al. [6] realizaron una revisión sobre la producción de biocombustibles líquidos, sus propiedades y estudios previos relacionados con el rendimiento y las características de combustión en condiciones de operación de turbinas a gas. Destacaron que el SAF obtenido por síntesis de FT tiene propiedades físicas similares al combustible convencional. Su ventaja principal radica en su bajo punto de fluidez, facilitando su uso en turbinas de gas de aviación, con rendimientos comparables y mejores emisiones de partículas. Sin embargo, su uso se limita por el alto costo de producción.

Otro estudio relevante, realizado por Santos et al. [7], revisó los aspectos de la producción de combustibles líquidos a partir de biomasa, destacando la necesidad de investigaciones adicionales para mejorar la

competitividad de los biocombustibles sintéticos en el mercado. Según un estudio llevado a cabo por Tiwari et al. [8], se destaca que la lignocelulosa emerge como una excelente alternativa para la producción de biocombustible. Sin embargo, su proceso de transformación resulta más complejo en comparación con otras vías, dado que las plantas con síntesis de FT tienen un costo de instalación más elevado, aunque generan menos GEI.

El uso de biocombustibles en la industria aérea representa un avance significativo hacia un futuro más sostenible. Aunque las tecnologías de producción presentan desafíos técnicos, los beneficios ambientales y económicos hacen que estas tecnologías sean una opción atractiva hacia la descarbonización aérea.

El objetivo de este estudio es determinar la biomasa disponible en Chile, los principales procesos a tener en cuenta en el diseño del proceso de FT y cuantificar la implementación de esta tecnología.

2. Metodología

2.1. Vías de producción de SAF

El proceso FT fue certificado en el 2009, tiene un límite de mezcla de 50% y utiliza como materia prima residuos urbanos, agrícolas y forestales, como también recursos no renovables como el carbón y el gas natural. Este proceso consiste en una reacción termoquímica catalizada en la que una mezcla de CO e H₂, conocida como gas de síntesis, es convertida en una combinación líquida y gaseosa de hidrocarburos. Por medio de una etapa de refinamiento, los hidrocarburos pasan por un proceso de hidrocrackeo e isomerización para obtener como producto final el SPK [9]. Se estima que entre 5 – 6 toneladas de biomasa pueden producir 1 tonelada de combustible líquido FT [10].

Las tecnologías de gasificación han sido utilizadas por décadas en diferentes aplicaciones. A escala comercial la síntesis de FT ha estado operando principalmente por Shell (en Malasia y Qatar) usando como materia prima el gas natural, y Sasol (en Sudáfrica) utiliza carbón [11]. Sin embargo, su aplicación en la producción de biocombustibles sigue en base de demostración, ya que la utilización de materias primas de origen biológico presenta desafíos que impactan en la selección de la tecnología de gasificación [12].

El proceso HEFA – SPK (*Queroseno parafínico sintético a partir de ésteres hidroprocesados y ácidos grasos*) fue certificado en el 2011, tiene un límite de mezcla de 50% y utiliza aceites vegetales, grasas animales, aceite de cocina usado, aceite de pirólisis y aceite de alga para producir hidrocarburos. Estos aceites deben ser tratados previamente para purificarlos y luego ser sometidos a reacciones como

hidrogenación, hidroisomerización e hidrocrackeo para obtener SPK.

Sin embargo, esta tecnología tiene un alto impacto ambiental asociado debido a que la hidrogenación catalítica requiere muchas moléculas de hidrógeno que suelen ser de origen fósil [11]. Se estima que 1.2 toneladas de aceite vegetal producen 1 tonelada de combustible HEFA [10].

Otro proceso es el ATJ – SPK (*Alcohol a queroseno parafínico sintético a reacción*) el cual en 2018 se certificó para un límite de mezcla de 50%. Esta tecnología aprovecha el almidón, biomasa lignocelulósica y azúcares para generar alcohol, el cual se somete a deshidratación, oligomerización e hidrogenación para producir SAF [11].

La aplicación de la cadena completa de obtención de biocombustibles con ATJ – SPK aún se encuentra en etapas piloto y de demostración del desarrollo, los procesos técnicos individuales empleados han sido implementados a escala comercial con éxito [13]. La desventaja de esta tecnología es el bajo rendimiento de conversión y los altos precios de las materias primas, lo cual no lo vuelve económicamente viable [14].

3. Resultados

3.1. Biomasa en Chile

La industria forestal produce una significativa cantidad de residuos en las distintas etapas del proceso productivo, como en aserraderos, plantas de celulosa y en los terrenos de plantación. Los aserraderos generan una gran cantidad de residuos, los cuales incluyen corteza, aserrín y restos de madera que no cumplen con los estándares de calidad. Debido al problema que supondría esta gran cantidad de residuos, la industria les ha dado un segundo uso, utilizando los residuos como combustible en sus procesos productivos, en la fabricación de pellet o quemándolos para reducir su tamaño.

No se encontraron datos específicos sobre la cantidad de biomasa disponible en los terrenos de plantación para fines energéticos. Sin embargo, se sabe que después de las actividades de cosecha, una considerable cantidad de residuos queda en el terreno, incluyendo ramas, hojas y tocones (parte del tronco que queda unida a la raíz).

3.1.1. Subproductos madereros de la industria del aserrío

Durante el año 2022, la industria del aserrío generó 7.86 millones de m³ de madera aserrada. Como subproductos madereros se generaron cerca de 4.74 millones de m³, de este total el 31% (1.47 millones de m³) se generaron en la región del Biobío. La actividad industrial basada en la madera de pino radiata,

particularmente la del aserrío, se concentra en las regiones del Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía [15]. En la Tabla 1 se presentan los subproductos generados a nivel nacional durante el año 2022.

Tabla 1. Volumen de subproductos madereros a nivel nacional.

Tabla 1	
Subproducto	Total [m ³]
Corteza	1,208,618
Lampazos	527,934
Aserrín primario	2,424,068
Aserrín secundario	163,223
Viruta	266,751
Despuntos	149,036
Total	4,739,631

Fuente: Subproductos madereros de la industria del aserrío 2023 [15].

Una parte de estos subproductos se utiliza en los propios aserraderos para autoconsumo, ya sea en la generación eléctrica o en la producción de vapor para sus procesos productivos, y otro porcentaje importante se comercializa para ser utilizados por diversas industrias.

La información recopilada indica que los subproductos de la industria del aserrío tienen distintos destinos. De esto se desprende que los subproductos destinados a regalar y acumular, los cuales se detallan en la Tabla 2 pueden utilizarse como biomasa en la síntesis de FT. Además, se deduce que la industria consume el 36% del total de subproductos generados, lo que evidencia una demanda significativa por parte de los aserraderos y reduce la generación de residuos para regalar y acumular.

Tabla 2. Volumen de subproductos madereros según tipo y destino a nivel nacional.

Tabla 2			
Subproducto	Regala [m ³]	Acumula [m ³]	Total [m ³]
Corteza	3,852	5,573	9,425
Lampazos	11,991	8,316	20,307
Aserrín primario	25,139	30,960	56,099
Aserrín secundario	1,447	557	2,004
Viruta	2,478	780	3,258
Despuntos	3,715	587	4,302
Total	48,622	46,772	99,696

Fuente: Subproductos madereros de la industria del aserrío 2023 [15].

Cabe destacar que el número de aserraderos en funcionamiento ha disminuido en los últimos años, lo cual afecta directamente la tasa de producción de madera aserrada y subproductos madereros. Además, se debe considerar que la mayor cantidad de residuos se generan en los terrenos de plantación, pero debido a la extensión de los terrenos y las distintas variables por las cuales se generan los residuos (factores climáticos, podas, cosecha) es difícil saber con certeza cuantas toneladas hay disponible para su uso.

Estos residuos se incorporan al suelo pudriéndose, son utilizados como leña por vecinos aledaños o se realizan quemas autorizadas para reducir su volumen y prevenir incendios forestales, desperdiciándose así toneladas de materia prima.

3.2. Proceso de Fischer-Tropsch

Para obtener el gas de síntesis, primeramente, la biomasa se debe secar para reducir el tamaño de las partículas durante el pretratamiento [16] y luego, mediante gasificación a temperaturas cercanas a 1300°C en presencia de oxígeno de alta pureza y vapor se obtiene el gas de síntesis [17]. Además, se cuenta con un sistema de enfriamiento del gas de síntesis por enfriamiento directo para eliminar las cenizas y alquitranes. Una vez producido el gas de síntesis, se debe pulir con óxido de zinc y un absorbente de carbón activado y se comprime a 25 bar, que corresponde a la presión de funcionamiento de FT [18].

La síntesis de FT es un conjunto de procesos catalíticos para convertir el gas de síntesis en hidrocarburos líquidos. Existen dos métodos de funcionamiento: el proceso a temperaturas de 300 – 350°C con catalizadores de hierro o a temperaturas de 200 – 240°C con catalizadores de hierro o cobalto [19]. Este proceso es altamente exotérmico por lo cual, el calor de reacción tiene que eliminarse rápidamente para evitar el sobrecalentamiento y la desactivación del catalizador. La selección del catalizador depende en gran medida de la temperatura de funcionamiento y de la presión parcial de los gases que entran en contacto dentro de este [20].

Actualmente la norma ASTM D7566 permite un límite de mezcla del 50% con combustible Jet A-1, debido a que de esta forma se garantiza la presencia de aromáticos en el combustible, los cuales son esenciales para un correcto y adecuado funcionamiento [21]. A continuación, se presentan las especificaciones que debe cumplir el Jet A-1 y, por ende, también la mezcla de SAF con combustible Jet A-1. Posteriormente se presenta una visión general de las operaciones que se deben considerar en el diseño de una planta con síntesis por FT.

2.3.1. Especificación para combustibles de aviación

Los combustibles de aviación para aeronaves propulsadas por motores de turbina de gas se conocen como Jet fuel los cuales provienen del queroseno. Existen dos tipos de combustibles, el Jet A es utilizado principalmente en EE. UU. y el Jet A-1 es utilizado ampliamente en el resto del mundo. La principal diferencia entre estos combustibles es su punto máximo de congelación, debido a que el Jet A-1 posee un punto de congelación más bajo es que es más adecuado para vuelos internacionales. Estos combustibles deben cumplir con ciertas especificaciones tales como temperatura máxima admisible del punto de congelación, viscosidad máxima admisible, contenido máximo admisible de azufre y aromáticos, contenido mínimo de aromáticos, punto de inflamación mínimo admisible, entre otros [22].

La norma que determina la composición y propiedades del combustible es la ASTM D1655 que especifica el estándar para combustibles de turbina de aviación. En la Tabla 3 se presentan las propiedades del combustible Jet A-1. La norma ASTM D7566 entrega la especificación estándar para combustible de turbinas de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados, esta norma asegura que el biocombustible puede ser mezclado con el Jet A-1 hasta un 50% para cumplir con la norma D1655, es decir, el combustible final contiene el mínimo de hidrocarburos aromáticos.

Tabla 3. Especificaciones para el combustible Jet A-1 según la norma ASTM D1655.

Tabla 3	
	Jet A-1
Composición	
Acidez total máx. [mg KOH/g]	0.1
Aromáticos máx. [% vol.]	25
Azufre total máx. [% en peso]	0.3
Volatilidad	
Punto de inflamación mín. [°C]	38
Densidad a 15°C [kg/m ³]	775 – 840
Fluidez	
Punto de congelación [°C], máx.	-47
Viscosidad a -20°C, máx.	8
Combustión	
Energía específica [MJ/kg], mín.	42.8

Fuente: D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuels [23].

2.3.2. Pretratamiento de la biomasa

El pretratamiento de la biomasa depende de la tecnología de gasificación que se utiliza, las características principales que se deben tener en cuenta son el secado de la biomasa debido a que el agua contenida en la biomasa debe evaporarse en el

gasificador por lo cual si se tiene un alto contenido de humedad se deberá aumentar el consumo de energía en la gasificación, otro problema asociado es que la temperatura de gasificación puede disminuir por lo que aumentaría la producción de alquitranes [23]. En la producción de gas de síntesis, la materia prima debe secarse por debajo del 30% en peso de contenido de humedad, preferiblemente a alrededor del 15% en peso [24].

Otro factor problemático es el tamaño de la partícula, la cual se muele hasta un tamaño aproximado de 3 mm. Las partículas pequeñas tienden a contener menos nitrógeno y álcalis, por lo que el fraccionamiento en partículas finas ayuda a producir un gas con menos impurezas [25].

2.3.3 Gasificación

Un gasificador es un reactor de conversión termoquímica donde una fuente de carbono (sólida o líquida) reacciona con un agente oxidante (O_2 puro o aire) y un agente gasificante (CO_2 , H_2O , H_2) produciendo gas de síntesis. Los gasificadores se clasifican por el método de contacto que utilizan entre las fases sólidas (biomasa) y gaseosa (agente oxidante). Según el tipo de contacto, las características y capacidades de los reactores difieren considerablemente y se pueden agruparse en tres tipos: gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y de arrastre [26].

Los gasificadores de lecho fijo son reactores tubulares de flujo continuo de dos fases (sólido y gas) empleados en procesos de conversión energética de mediana y pequeña escala. Su temperatura de operación es entorno a los $1000^\circ C$ y se clasifican según la dirección del flujo de aire en de corriente ascendente, de corriente descendente o de flujo cruzado. Este tipo de gasificadores tienen la desventaja de producir un gas de síntesis con bajo poder calorífico y alto contenido de alquitrán. Por lo cual la biomasa debe ser previamente secada y contener una humedad menor al 15 – 20% [27]. Este tipo de gasificadores son los más utilizados tanto para estudios a pequeña escala como para fines industriales.

En el gasificador de lecho fluidizado los procesos de secado, pirólisis, oxidación y reducciones ocurren simultáneamente en todos los puntos del gasificado. Estos gasificadores tienen una distribución de temperatura uniforme a diferencia de los gasificadores de lecho fijo. Existen principalmente dos tipos de gasificadores de lecho fluidizado: lecho fluidizado burbujeante y lecho fluidizado circulante. La dificultad de este gasificador es que el gas de síntesis obtenido contiene varias impurezas tales como partículas, alquitrán, compuesto de nitrógeno, compuestos de azufre y compuestos alcalinos [27].

Los gasificadores de arrastre operan a $1400^\circ C$ y presiones de 20 – 70 bar, la factibilidad de estos gasificadores para tratar con biomasa es baja debido a que provocan fusión entre la ceniza y alcalinos [26].

2.3.4 Limpieza del gas de síntesis

El gas de síntesis obtenido del proceso de gasificación pueden contener diferentes tipos de contaminantes tales como partículas, alquitranes, compuesto alcalinos, entre otros. Estos contaminantes reducen la eficiencia del proceso de FT debido a que envenenan al catalizador [28], por lo que es necesario eliminarlas para cumplir las especificaciones de síntesis de FT que se presentan en la Tabla 4.

La calidad del gas depende del modelo del reactor, la composición química de la biomasa, la temperatura y la relación de equivalencia. La limpieza de estos gases se puede realizar como primera etapa antes o durante el proceso de gasificación e involucra el pretratamiento de biomasa. Una segunda etapa contempla el separar las cenizas, el reformado de alquitrán y metano, la eliminación de H_2S y COS y ajuste en la relación $H_2 - CO$.

Tabla 4. Requerimientos del gas de síntesis para la síntesis de FT.

Tabla 4	
Impureza	Nivel de eliminación
$H_2S + COS + CS_2$	< 1 ppmV
$NH_3 + HCN$	< 1 ppmV
$HCl + HBr + HF$	< 10 ppbV
Metales alquinos	< 10 ppbV
Sólidos (hollín, polvo, cenizas)	Esencialmente por completo
Compuestos orgánicos ^a (alquitranes)	Por debajo del punto de rocío
Clase 2 ^b (heteroátomos)	< 1 ppmV
^a Entre los compuestos orgánicos también se incluye el BTX.	^b Los alquitranes de clase 2 comprenden el fenol, la piridina y el tiofeno.

Fuente: Boerrigter et al. [29].

Para el reformado del metano existen 3 vías, la primera es el reformado autotérmico (ATR) cuyo objetivo es la oxidación exotérmica del metano con una mezcla de oxígeno, vapor y/o dióxido de carbono con metano. Por otro lado, el reformado con vapor (SMR) utiliza como agente oxidante el vapor, por lo que la reacción es endotérmica. Los sistemas SMR suelen operar a temperaturas más bajas que el sistema ATR [30]. Por último, el reformado con oxidación parcial (POX) consiste en la oxidación por oxígeno en un proceso exotérmico, si el gas de síntesis posee un alto contenido de hidrógeno éste puede reaccionar con el oxígeno e inflamarse espontáneamente [31].

En la eliminación de H_2S y COS se utilizan técnicas de tratamiento como adsorción, condensación, reacciones de oxidación, combustión catalítica y tratamiento con gases ácidos. La adsorción es un método ampliamente utilizado para el tratamiento del azufre debido a su alta eficiencia, confiabilidad y rango de temperaturas de trabajo. Entre los absorbentes se suele utilizar óxidos metálicos, mezclas de un óxido inerte con un reactivo sólido, zeolitas, carbón activado y arcillas [32].

Para ajustar la proporción de H_2 y CO a aproximadamente 2:1 antes de entrar a la reacción FT [33], se puede utilizar la adsorción por cambio de presión (PSA), la adsorción de impurezas ocurre a altas presiones y a una temperatura cercana a la temperatura ambiente, aproximadamente el 90% del hidrógeno puede ser separado [34]. Este hidrógeno puede ser utilizado en la etapa de hidrocrackeo / isomerización.

2.3.5 Síntesis de Fischer-Tropsch

La reacción FT produce hidrocarburos de longitud de cadena variable a partir del gas de síntesis. La selectividad del proceso esta influenciada por una serie de factores, tanto dependientes del catalizador (tipo de metal, soporte, preparación, precondicionamiento y edad del catalizador) como no dependientes del catalizador (relación H_2 - CO en el gas de alimentación, temperatura, presión y tipo de reactor). El proceso de FT suele funcionar a presiones que oscilan entre 20 – 40 bar y a 180 – 250°C [28]. Existen tres tipos principales de reactores para FT, los cuales son el reactor de lecho fluidizado, el reactor de lecho fijo y el reactor de fase de suspensión.

Para la obtención de hidrocarburos de cadena larga, el reactor debe operar a 240°C y 25 bar utilizando un catalizador de cobalto. Aquí una fracción del gas de síntesis se convierte en una variedad de hidrocarburos gaseosos (C_1 , C_2 , C_3) y líquidos (C_5 – C_{30}), a esto se le conoce como petróleo sintético, también se genera agua. El petróleo sintético se envía a la columna de destilación atmosférica, la cual se utiliza para separar diferentes gamas de hidrocarburos en función de sus puntos de ebullición. Algunas etapas más debajo de la cabeza de la columna, se encuentra la fracción de combustible para aviones (C_8 a C_{16}) y más abajo, la fracción diésel (C_{17} a C_{20}). Finalmente, del fondo de la columna se extraen los hidrocarburos pesados (C_{21+}) o ceras [35].

2.3.6 Hidrocrackeo

Debido a que la cera no es un producto deseado, se incorpora una unidad de hidrocrackeo con el objetivo de romper las cadenas largas de hidrocarburos para obtener hidrocarburos más pequeños y así maximizar la producción de combustible para aviones. En el

proceso de hidrocrackeo los líquidos FT se craquean catalíticamente con hidrógeno. Las condiciones de hidrocrackeo como temperatura, presión y flujo de entrada de H_2 pueden modificarse de forma relativamente sencilla para obtener la mezcla de productos deseada [35].

En el trabajo realizado por Rojas et al. [35] se seleccionan las condiciones de operación de 50 bar, 277°C y 1.5% de H_2 en el flujo de entrada del reactor. Teóricamente estas condiciones permitirían una conversión completa de las ceras en un 50% de combustibles para aviones, 30% de diésel, 15% de gasolina y 5% en gases ligeros.

3.3. Análisis económico

Existe una gran cantidad de estudios sobre análisis técnicos, económicos y ambientales de la implementación de plantas con síntesis de FT para biomasa con distintos orígenes, priorizando siempre la materia prima más abundante del país de estudio. Un ejemplo de estos estudios es el realizado por Rojas et al. [35], donde se evaluó la viabilidad económica y ambiental de la producción de combustibles para aviones a partir de gas de síntesis derivado de residuos forestales en una localidad de Inglaterra. En base a la información recaudada de la biomasa disponible, la capacidad de la planta se fijó en 20 t/h de biomasa seca.

Del análisis económico obtuvieron que el proceso requiere un gran gasto capital, el cual se presenta en la Tabla 5. Obtuvieron que la mayor inversión se concentraba en los procesos de pretratamiento, gasificación y la síntesis de FT, este alto costo de inversión afecta el precio mínimo de venta del biocombustible, el cual tendría un valor de 3.90 USD/kg para ser rentable. Debido a que el precio de entrada del combustible fósil era de 0.72 USD/kg cuando se realizó el estudio, es necesario seguir desarrollando investigaciones para disminuir los costos de inversión.

Tabla 5. Costo de equipo adquirido, inversión de capital fijo y requerimiento total de capital.

Tabla 5	
Proceso	Costo [MM CLP]
Pretratamiento y gasificación de la biomasa	14,528 (22.09%)
Limpieza del gas de síntesis	5,038 (7.66%)
Captura de CO_2	810 (1.23%)
Síntesis de FT	33,061 (50.28%)
Mejora del petróleo sintético	6,460 (9.82%)
Sistema de cogeneración y agua de refrigeración	5,861 (8.91%)
Costo de equipo adquirido	65,758
Inversión de capital fijo	200,246
CAPEX	214,458

Fuente: Rojas et al. [35].

Debido a que el proceso de generación de biocombustibles está asociado a grandes costos de inversión, el estudio señalado anteriormente menciona que, si el tamaño de la planta aumenta a 100 toneladas/h de materia prima, el precio mínimo de venta podría reducirse en un 33%.

Por otro lado, Snehesh et al. [36] realizaron un análisis de la viabilidad económica en una planta de biomasa a líquido (BtL). El gas de síntesis para el sistema se genera en un sistema de gasificación de lecho fijo de vapor – oxígeno diseñado para un consumo de biomasa (Casurina) de 1 t/h. La reacción FT se logra en un reactor de lecho fijo multitubular de un solo paso mantenido a 503 K y 3 MPa.

El estudio señala que, para una generación de combustible líquido competitiva en el mercado, la conversión del CO debe mantenerse por encima del 60%, y demostró que para una conversión del CO del 65.6% y 73.1% resultaron en precios de combustibles líquidos de 0.59 USD/litro y 0.54 USD/litro respectivamente (considerando el precio de dólar estadounidense en 2017).

El precio de la biomasa también es un factor crítico; un aumento del 50% en el costo de la biomasa resulta en un incremento del 15 – 18% en el costo del combustible líquido. A diferencia de otros estudios que sugieren que la tecnología es insostenible económicamente a menores escalas de producción, este estudio muestra que es viable incluso a menores niveles de procesamiento.

El precio mínimo de venta del SAF se ve afectado por el alto costo de inversión asociado al proceso, el costo de operación, el costo de la biomasa, entre otros factores. Esto ubica el precio del SAF entre 2 y 4 veces por encima del precio del combustible tradicional. A pesar del elevado precio del SAF, las aerolíneas están comprometidas con el avance hacia la descarbonización, lo cual resulta en un aumento en la demanda de biocombustible.

Durante el 2023, los volúmenes de SAF alcanzaron más de 600 millones de litros, el doble de los 300 millones de litros producidos en 2022, pero aun así solo representa el 0.2% de todo el combustible para aviación del año [37]. Los volúmenes limitados significan que el combustible para aviación es mucho más caro que el combustible para aviación comercial.

3.4. Análisis ambiental

La combustión estequiométrica completa de 1 kg de combustible para avión (queroseno) en el motor de un avión produce 3.16 kg de CO₂. Sin embargo, las emisiones de CO₂ por vuelo dependen de una serie de factores como el tamaño de la aeronave, la distancia recorrida, la carga transportada (pasajeros y carga) y las condiciones meteorológicas [38]. En un estudio

realizado por Liao et al. [39] se señalan las emisiones producidas por un avión A320 en las etapas de ascenso/crucero/descenso considerando una altura por encima de los 3000 pies. En la Tabla 6, se presenta una estimación de las emisiones para estas 3 etapas considerando distintas longitudes de duración. Estas estimaciones de emisiones no consideran las variaciones en las actividades de aviación y la altitud a la que vuela la aeronave.

A diferencia del combustible convencional, los SAF derivados de biomasa tienen una menor huella de carbono a lo largo de su ciclo de vida. Esto se debe a que el carbono liberado durante la combustión puede compensarse con el CO₂ absorbido durante el ciclo de vida de la materia prima, por lo cual puede considerarse carbono neutral. Además, pueden reducir las emisiones de otros contaminantes como SO_x, NO_x y el material particulado, ya que en su composición no contiene azufre [40].

3.5. Contexto actual en Chile

A medida que se expanda la producción, se espera que el SAF pueda competir en precio. Para esto, se requiere la colaboración entre los gobiernos, la industria y los reguladores a escala global. Los altos costos de capital y de operación resultan en una mala economía sin un subsidio. En este sentido, el gobierno de Chile ha estado promoviendo diversas iniciativas e incentivos financieros para fomentar el desarrollo de investigaciones, como los fondos públicos y subsidios para proyectos de innovación y desarrollo tecnológico, créditos tributarios para las inversiones en proyectos de energías renovables y eficiencias energéticas, entre otros. Además, el país ha establecido metas claras para la reducción de emisiones de carbono y la promoción de energías renovables. Estas políticas proporcionan un marco favorable para la inversión en estas nuevas tecnologías sustentables.

Tabla 6. Emisiones de un avión A320 en ascenso/crucero/descenso.

Vuelo [nm]	CO ₂ [kg]	NO _x [kg]	SO _x [kg]	CO [kg]
200	4,273	25.70	1.14	4.49
250	5,189	30.11	1.38	5.00
500	9,280	47.54	2.47	7.36
750	12,992	62.11	1.38	9.79
1000	16,611	76.68	2.47	12.33
1500	24,471	108.80	3.46	16.71

Fuente: Liao et al. [39].

En cuanto al desarrollo de SAF en Chile, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y el Ministerio

de Energía, junto con la Agencia de Sostenibilidad Energética, a través del programa Vuelo Limpio, y con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo, han levantado una mesa de trabajo público – privada denominada Mesa SAF. En conjunto, han publicado la primera Hoja de Ruta de SAF 2050 [41] en Chile, en donde recopilaron antecedentes de los actores relaciones con la industria de combustibles, aviación y residuo, que tendrían una participación en la futura cadena de valor de los SAF.

Debido a que la biomasa forestal posee múltiples usos en Chile, desde la construcción hasta la calefacción, su alta demanda ha generado disponibilidad limitada. Las corporaciones de la industria forestal señalan que su disponibilidad podría incrementarse si se implementaran planes para la gestión de residuos forestales que permitiera ampliar su oferta [41]. Con lo expuesto hasta ahora, una forma de cubrir el costo inicial es realizando un convenio con un aserradero para instalar una planta en sus cercanías; de esta forma se cubrirían gastos asociados al transporte de la materia prima y la planta puede generar electricidad o vapor que puede ser utilizado por el aserradero.

4. Conclusiones

Reducir las emisiones netas de carbono es una carrera contrarreloj en todas las industrias y países del mundo. Gracias a la investigación activa y al compromiso de las naciones, es que el uso de SAF en aviones comerciales ya es una realidad en países desarrollados, aunque aún se deben seguir desarrollando investigaciones para mejorar las tecnologías existentes y en desarrollo. La síntesis de FT a partir de residuos forestales emerge como una prometedora tecnología para Chile. Este proceso es crucialmente dependiente de la disponibilidad de biomasa adecuada, la cual abunda gracias a la robusta industria forestal del país.

El proceso de FT involucra etapas críticas, como lo son el pretratamiento de la materia prima y la gasificación, cada una con impactos significativos en la eficiencia y los costos. Entre estas etapas se destaca la importancia de conocer la composición de la materia prima y en base a esto realizar un adecuado pretratamiento. La gasificación de la materia prima representa un método simple pero robusto que no presenta grandes complicaciones de implementar; los gasificadores implementados son principalmente de dos tipos, de lecho fijo y fluidizado, su selección depende de la composición que se desea del gas de síntesis y el pretratamiento que tuvo la materia prima. Otra etapa crítica es el proceso es la limpieza del gas de síntesis antes de entrar a la síntesis por FT. Las tecnologías existentes son caras y/o no tienen un alto grado de eficiencia, debido a esto es que hay avances continuos en investigación que buscan optimizar estas tecnologías. Los elevados costos de implementación

disparan el precio de venta que tendría el líquido FT, haciendo que no sea competencia frente a los bajos precios del combustible tradicional.

El análisis económico revela que los mayores costos se concentran en el pretratamiento, gasificación y síntesis por FT, representando aproximadamente el 70% del capital de inversión. Por lo cual, es necesario contar con el apoyo gubernamental para amortiguar los costos de inversión. En este ámbito, Chile ha demostrado su compromiso para alcanzar la descarbonización del país para el año 2050, siendo parte del ACT-SAF de la OACI. Por lo cual, existe una motivación económica para el desarrollo de este tipo de tecnologías en el país.

Además, la colaboración con la industria forestal local es fundamental para optimizar la logística y reducir costos asociados a la biomasa y el transporte de esta. Esto no solo fortalece la viabilidad económica de los SAF, sino que también refuerza el compromiso de Chile con la descarbonización y sostenibilidad ambiental. Con la información expuesta en este trabajo, se concluye que la síntesis de FT a partir de residuos forestales representa una oportunidad estratégica para Chile en su camino hacia una economía baja en carbono. Con el apoyo adecuado y un enfoque continuo en la innovación tecnológica, el país puede ser parte de la transición hacia una aviación más limpia y sostenible a nivel global.

4.1. Agradecimientos

La autora agradece a la profesora Einara Blanco Machín por introducirla en el estudio de la termoconversión de biomasa en general y proporcionar una guía durante toda la investigación.

5. Referencias

- [1] E. Bustos, “Sustentabilidad en los cielos: Combustibles más eficientes, materiales más livianos y aparatos supersónicos son las metas de las fábricas para los futuros modelos de aviones privados,” *Revista Latin Trade*, vol. 26, no. 3, pp. 62–64, Sep. 2018.
- [2] “Air Transport Action Group | ATAG.” Accessed: Mar. 13, 2024. [Online]. Available: <https://atag.org/>
- [3] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, “Chile formaliza su compromiso de avanzar en la descarbonización del transporte aéreo | JAC Chile.” Accessed: Mar. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.jac.gob.cl/chile-formaliza-su-compromiso-de-avanzar-en-la-descarbonizacion-del-transporte-aereo/>
- [4] T. Kandaramath Hari, Z. Yaakob, and N. N. Binitha, “Aviation biofuel from renewable resources:

Routes, opportunities and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1234–1244, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.095.

[5] M. T. Timko et al., “Particulate Emissions of Gas Turbine Engine Combustion of a Fischer–Tropsch Synthetic Fuel,” *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 11, pp. 5883–5896, Nov. 2010, doi: 10.1021/ef100727t.

[6] M. C. Chiong et al., “Liquid biofuels production and emissions performance in gas turbines: A review,” *Energy Convers Manag*, vol. 173, pp. 640–658, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.082.

[7] R. G. dos Santos and A. C. Alencar, “Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 36, pp. 18114–18132, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.133.

[8] R. Tiwari et al., “Environmental and economic issues for renewable production of bio-jet fuel: A global prospective,” *Fuel*, vol. 332, p. 125978, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125978.

[9] E. Cabrera and J. M. Melo de Sousa, “Use of Sustainable Fuels in Aviation—A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 7, MDPI, Apr. 01, 2022, doi: 10.3390/en15072440.

[10] “IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap 1st Edition,” 2015.

[11] K. S. Ng, D. Farooq, and A. Yang, “Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111502, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111502.

[12] C. B. Porras, R. Orozco, M. María, and C. Souza De Resende, *Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación* Equipo de trabajo Agustín Torroba. [Online]. Available: <http://www.iica.int>.

[13] R. Mawhood, E. Gazis, S. de Jong, R. Hoefnagels, and R. Slade, “Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 10, no. 4, pp. 462–484, Jul. 2016, doi: 10.1002/bbb.1644.

[14] B. H. H. Goh et al., “Recent advancements in catalytic conversion pathways for synthetic jet fuel produced from bioresources,” *Energy Convers*

Manag, vol. 251, p. 114974, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114974.

[15] J. Gysling and B. Juan Carlos, *Subproductos madereros de la industria del aserrío 2023*. INFOR, 2023, doi: 10.52904/20.500.12220/32663.

[16] F. You and B. Wang, “Life Cycle Optimization of Biomass-to-Liquid Supply Chains with Distributed–Centralized Processing Networks,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, no. 17, pp. 10102–10127, Sep. 2011, doi: 10.1021/IE200850T.

[17] W. C. Wang and L. Tao, “Bio-jet fuel conversion technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, Elsevier Ltd, pp. 801–822, Jan. 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.016.

[18] J. Hu, F. Yu, and Y. Lu, “Application of fischer-tropsch synthesis in biomass to liquid conversion,” *Catalysts*, vol. 2, no. 2, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), pp. 303–326, Jun. 15, 2012, doi: 10.3390/catal2020303.

[19] M. E. Dry, “Present and future applications of the Fischer–Tropsch process,” *Appl Catal A Gen*, vol. 276, no. 1–2, pp. 1–3, Nov. 2004, doi: 10.1016/J.APCATA.2004.08.014.

[20] S. T. Sie and R. Krishna, “Fundamentals and selection of advanced Fischer–Tropsch reactors,” *Appl Catal A Gen*, vol. 186, no. 1–2, pp. 55–70, Oct. 1999, doi: 10.1016/S0926-860X(99)00164-7.

[21] M. Kousoulidou and L. Lonza, “Biofuels in aviation: Fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 46, pp. 166–181, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.03.018.

[22] “D1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuels.” Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d1655-18.html>

[23] S. Tuomi, E. Kurkela, I. Hannula, and C. G. Berg, “The impact of biomass drying on the efficiency of a gasification plant co-producing Fischer-Tropsch fuels and heat – A conceptual investigation,” *Biomass Bioenergy*, vol. 127, p. 105272, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2019.105272.

[24] L. Fagernäs, J. Brammer, C. Wilén, M. Lauer, and F. Verhoeff, “Drying of biomass for second generation synfuel production,” *Biomass Bioenergy*, vol. 34, no. 9, pp. 1267–1277, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2010.04.005.

- [25] M. M. Wright, D. E. Daugaard, J. A. Satrio, and R. C. Brown, "Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels," *Fuel*, vol. 89, pp. S2–S10, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.07.029.
- [26] L. E. Arteaga Pérez, Y. Casas Ledón, J. Cabrera Hernández, and L. Rodríguez Machín, "Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación," *AFINIDAD LXXII*, pp. 138–145, May 2014.
- [27] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies," *Bioresour Technol*, vol. 83, no. 1, pp. 55–63, May 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00120-1.
- [28] M. J. Tijmensen, A. P. Faaij, C. N. Hamelinck, and M. R. van Hardeveld, "Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification," *Biomass Bioenergy*, vol. 23, pp. 129–152, 2002.
- [29] H. Boerrigter, H. P. Calis, D. J. Slort, and H. Bodenstein, "Gas cleaning for integrated biomass gasification (BG) and Fischer-Tropsch (FT) systems; experimental demonstration of two BG-FT systems," Petten, The Netherlands, May 2004.
- [30] J. M. Lavoie, "Review on dry reforming of methane, a potentially more environmentally-friendly approach to the increasing natural gas exploitation," *Front Chem*, vol. 2, Nov. 2014.
- [31] W.-C. Wang, Y.-C. Liu, R. Aditya, and A. Nugroho, "Techno-economic analysis of renewable jet fuel production: The comparison between Fischer-Tropsch synthesis and pyrolysis," 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121970.
- [32] H. F. Garces, H. M. Galindo, L. J. Garces, J. Hunt, A. Morey, and S. L. Suib, "Low temperature H₂S dry-desulfurization with zinc oxide," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 127, no. 3, pp. 190–197, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.micromeso.2009.07.022.
- [33] F. You and B. Wang, "Life Cycle Optimization of Biomass-to-Liquid Supply Chains with Distributed-Centralized Processing Networks," *Ind Eng Chem Res*, vol. 50, no. 17, pp. 10102–10127, Sep. 2011, doi: 10.1021/IE200850T.
- [34] D. P. Harrison, "Sorption-Enhanced Hydrogen Production: A review," *Ind Eng Chem Res*, vol. 47, pp. 6486–6501, 2008.
- [35] M. F. Rojas Michaga et al., "Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) potential in jet fuel production from forestry residues: A combined Techno-Economic and Life Cycle Assessment approach," *Energy Convers Manag*, vol. 255, p. 115346, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115346.
- [36] A. S. Snehes, H. S. Mukunda, S. Mahapatra, and S. Dasappa, "Fischer-Tropsch route for the conversion of biomass to liquid fuels - Technical and economic analysis," *Energy*, vol. 130, pp. 182–191, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.101.
- [37] "Sustainable Aviation Fuel | Decarbonisation | Airbus." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation/sustainable-aviation-fuels>
- [38] Venkataramanan, "IATA Carbon Offset Program Frequently Asked Questions Copyright Information".
- [39] W. Liao, Y. Fan, C. Wang, and Z. Wang, "Emissions from intercity aviation: An international comparison," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 95, p. 102818, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.TRD.2021.102818.
- [40] R. Khujamberdiev and H. M. Cho, "Biofuels in Aviation: Exploring the Impact of Sustainable Aviation Fuels in Aircraft Engines," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 11, p. 2650, May 2024, doi: 10.3390/en17112650.
- [41] Y. Arteaga, J. Brañes, F. Cabañas Fabián Olave - Empresa Nacional del Petróleo, S. Córdoba, G. Gonthier, and M. Guerrero Paulina Valenzuela, "HOJA DE RUTA DE SAF 2050".